

计及机组组合状态调整的发电计划安全校正策略

李利利¹, 姚建国², 杨争林¹, 耿建¹

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210061;

2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要:发电计划安全校正是调度计划和调度运行的一项重要内容。提出了一种基于调整量最小的安全约束经济调度模型的发电计划安全校正新策略,并通过松弛机组出力限值约束,可以在调整机组出力无法满足电网安全的情况下,进一步调整机组的组合状态来消除潮流越限,从而提高安全校正算法的鲁棒性和实用性。实际系统算例分析证明了算法的有效性,在此基础上开发的基于线性规划的调度计划系统已成功应用于某省级电网。

关键词:发电计划;安全校正;安全约束经济调度;松弛约束;组合状态调整;线性规划

0 引言

随着智能电网建设的推进,对电网资源优化配置的要求不断增强^[1],要求发电计划的编制既满足电网安全要求,又能充分挖掘电网的经济潜力,实现电网安全与经济运行的有机结合。长期以来,发电计划的制定以“三公”调度为原则,尽可能采用分区平衡的方式,一般不会引起系统安全问题。随着互联电网的发展和节能发电调度的实施,电网的传输容量逐渐逼近极限容量,需要对发电计划进行安全校核,同时采用安全校正算法对发电计划进行优化调整,提高短期发电计划的可操作性^[2]。

为快速解决系统中的安全问题,传统安全校正策略一般以调整量最小为目标,在单时段对机组出力进行调整,主要用于实时调度领域^[3-4]。当扩展到日发电计划校正时,存在以下缺陷:①单个时段优化,时段之间是相互独立的,无法考虑机组出力的多时段耦合约束关系;②以调整总量最小为目标使得单时段的机组出力调整具有随机性,当扩展到多时段时,会造成机组出力的剧烈波动;③安全校正不改变机组组合方式,仅通过调整机组出力来消除越限,当初始开停机方案不合理时,会出现算法无解的情况。

基于上述问题,本文建立了以调整量最小为目标的安全约束经济调度(SCED)模型,实现了发电计划的快速安全校正;通过松弛机组出力限值约束,进一步提出了机组组合状态的调整策略,可以在安

全校正中调整机组开停来消除潮流越限。实例分析表明,文中提出的发电计划安全校正策略切实可行且有效,并在实际生产中得到应用。

1 基于调整量最小的 SCED 模型

1.1 建模思路

期望计划是反映调度目标的重要载体。期望计划的编制一般根据调度模式,按照相应的计划编制原则计算形成。例如:在“三公”模式下,考虑年度合同电量、已完成电量等因素,计算各机组在计划日的期望电量和电力计划;在节能模式下,按机组排序表依次调用各类发电资源;在市场模式下,按电厂报价由低到高的原则编制发电计划。

获得期望计划后,需要进行发电计划的安全校核与校正。在安全校正环节,调整量越少,则发电计划偏离调度目标越少,因此,安全校正要求发电计划与期望计划之间的差异最小化。

SCED 将机组出力分配与电网安全联合优化,是解决电网安全和多时段发电计划优化的良好工具,近年来得到了广泛的研究和应用^[5-8]。通过把 SCED 的优化目标由发电成本最小转换为偏差最小,可以建立调整量最小的新型 SCED 模型,实现发电计划的安全校正。

1.2 数学模型

在机组开停机方式确定的条件下,以各机组出力调整量最小为目标优化发电计划,满足系统负荷需求和机组运行约束,并且满足电网运行的潮流约束。

目标函数中引入各机组出力调整的成本曲线,通过对机组的出力调整量进行分段,形成机组出力调整的微增成本曲线,如图 1 所示。

收稿日期:2010-11-08;修回日期:2011-03-14。

国家科技支撑计划重大项目(2008BAA13B06);国家电网公司科技项目(SG0835)。

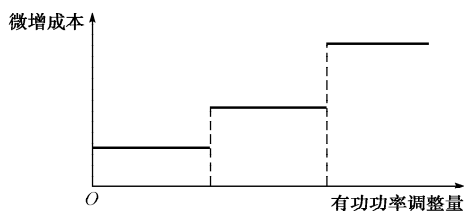


图1 机组出力调整的微增成本曲线
Fig.1 Incremental cost curve of unit output power adjustment

由图1可以看出,随着调整量的增加,微增成本递增,从而优化机组出力,贴近于其期望计划出力。数学表达为:

$$\min f = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S l(i, t, s) c_{i,s} \quad (1)$$

同时有如下约束关系:

$$|p(i, t) - p_0(i, t)| = \sum_{s=1}^S l(i, t, s) \quad (2)$$

式中: T 为调度期间的时段数; I 为系统机组数; S 为成本曲线分段数; $l(i, t, s)$ 为机组 i 处于成本曲线 s 段内的出力调整量; $c_{i,s}$ 为机组 i 在成本曲线 s 段内的微增成本; $p(i, t)$ 为机组 i 在时段 t 的出力; $p_0(i, t)$ 为机组 i 在时段 t 的期望出力。

约束条件包括系统功率平衡约束、旋转备用约束,机组出力限值约束、爬坡速率约束,以及电网安全约束。

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^I p(i, t) = p_d(t) \quad (3)$$

式中: $p_d(t)$ 为系统在时段 t 的总负荷。

2) 系统旋转备用约束

$$\sum_{i \in M} r(i, t) \geq p_r(t) \quad (4)$$

式中: $r(i, t)$ 为机组 i 在时段 t 提供的旋转备用; $p_r(t)$ 为系统在时段 t 的旋转备用需求。

3) 机组出力限值约束

$$p_{i,\min} u_{i,t} \leq p(i, t) \leq p_{i,\max} u_{i,t} \quad (5)$$

式中: $p_{i,\max}$ 和 $p_{i,\min}$ 分别为机组 i 出力的上、下限; $u_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的组合状态。

4) 机组爬坡速率约束

$$-\Delta_i \leq p(i, t) - p(i, t-1) \leq \Delta_i \quad (6)$$

式中: Δ_i 为机组 i 每时段爬坡速率的最大值。

5) 电网安全约束

$$\left| \sum_{i \in M} (p(i, t) - l(i, t)) S(i, j, t) \right| \leq p_{ij,\max} \quad (7)$$

式中: $p_{ij,\max}$ 为支路 $i-j$ 的潮流上限; M 为电网计算节点集合; $l(i, t)$ 为节点负荷功率; $S(i, j, t)$ 为节点 i

的注入功率对支路 $i-j$ 的灵敏度。

1.3 模型特点

根据式(1)~式(7),上述模型具有以下特点:

1) 基于 SCED 的校正计算模型不再是对每个越限时段孤立点的优化,而是对全部时段统一建模,从根本上考虑了多时段的耦合约束。

2) 在优化目标中构造出力调整量的成本曲线,调整量越大,产生的成本相应越高,从而使系统各机组的出力尽可能贴近期望计划出力,实现了调整量最小的目标,同时有效避免了出力调整的随机性。

3) 采用灵敏度形式构建电网安全约束,可以在模型中实现全网络约束,从而保证在优化中消除越限断面的同时不会引起新的断面潮流越限。

2 鲁棒性分析

本文应用 CPLEX 商用算法包,采用线性规划(LP)实现了调整量最小的 SCED 算法,并成功应用于日发电计划安全校正。采用多个网省级电网的实际算例,对算法进行了正确性和计算性能测试。

校正模型优化机组出力来满足各种约束条件,尤其是电网安全约束。但模型不改变机组组合状态,若期望计划的开停机方案不合理,会导致优化模型无解,给调度运行带来极大的干扰。为提高算法的鲁棒性和实用性,要求在安全校正中考虑机组组合状态的调整,保证算法可靠收敛。

因此,安全校正的主要功能是:在获得期望发电计划后,如果可以通过调整机组出力来恢复安全,则给出机组出力调整措施;如果必须对机组开停作进一步修正,则给出机组组合调整措施。

调整量最小的 SCED 模型通过调整机组出力来满足电网安全,不改变机组组合状态。因此,可以考虑建立调整量最小的安全约束机组组合(SCUC)模型,来同时调整机组的组合状态和出力^[9-11]。但此时求解的算法模型变为混合整数规划(MIP),计算量大,且对建模技巧的要求较高。因此,本文通过在 SCED 模型中加入机组出力限值的松弛约束,在 LP 的求解范围内实现了计及机组组合状态调整的安全校正。

3 机组组合状态调整

3.1 松弛约束模型

松弛约束是发电计划优化建模中常用的工程处理策略,通过在模型中引入松弛变量和对应的目标惩罚系数,确保优化模型始终有解^[8]。

在模型中对机组出力上、下限进行松弛,引入松弛变量 $p^+(i, t)$ 和 $p^-(i, t)$,将式(5)改写为:

$$p(i, t) \leq p_{\max} u_{i,t} + p^+(i, t) \quad (8)$$

$$p(i, t) \geq p_{\min} u_{i,t} - p^-(i, t) \quad (9)$$

并增加约束:

$$\begin{cases} p^+(i, t) \geq 0 \\ p^-(i, t) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

同时,在优化目标中增加分量:

$$\rho_{fi} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T p^-(i, t) + \rho_{fi} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T p^+(i, t) \quad (11)$$

式中: ρ_{fi} 为限值约束松弛惩罚系数。

3.2 松弛模型分析与改进

根据上述松弛约束模型,优化算法实现了如下功能。

1)假设机组*i*在时段*t*为停机状态($u_{i,t}=0$),为满足安全约束,需要将其状态调整为开机:基于式(8),优化后 $p^+(i, t)$ 非0,即通过松弛约束,机组状态为停机,但有出力存在,可以认为此机组需要开机来满足安全约束。

2)假设机组*i*在时段*t*为开机状态($u_{i,t}=1$),为满足安全约束,需要将其状态调整为停机:基于式(9),优化后 $p^-(i, t)$ 非0,即通过松弛约束,机组状态为开机,但出力低于下限,可以认为此机组需要停机来满足安全约束。

进一步分析模型可以发现,松弛约束模型可能会产生如下结果。

1)基于式(8),机组*i*在时段*t*为开机($u_{i,t}=1$),为满足安全约束,优化后 $p^+(i, t)$ 非0,即开机机组出力高于其上限,不合理。

2)基于式(9),机组*i*在时段*t*为停机($u_{i,t}=0$),为满足安全约束,优化后 $p^-(i, t)$ 非0,即停机机组出力为负值,不合理。

为避免出现上述2种结果,修改松弛约束模型,将式(8)、式(9)改写为:

$$p(i, t) \leq p_{\max} u_{i,t} + p^+(i, t)(1 - u_{i,t}) \quad (12)$$

$$p(i, t) \geq p_{\min} u_{i,t} - p^-(i, t)u_{i,t} \quad (13)$$

当 $u_{i,t}=0$ 时,只允许松弛上限,式(12)、式(13)转化为:

$$0 \leq p(i, t) \leq p^+(i, t) \quad (14)$$

当 $u_{i,t}=1$ 时,只允许松弛下限,式(12)、式(13)转化为:

$$p_{\min} - p^-(i, t) \leq p(i, t) \leq p_{\max} \quad (15)$$

3.3 组合状态调整

如果优化机组出力能消除网络越限,为降低优化目标,所有 $p^+(i, t)$ 和 $p^-(i, t)$ 的优化结果为0;一旦有机组某时段的 $p^+(i, t)>0$ 或 $p^-(i, t)>0$,则表示在仅改变机组出力的条件下,找不到满足所有约束的最优解,需要调整机组组合状态。

基于松弛约束模型,若优化后得到非0的 $p^+(i, t)$ 和 $p^-(i, t)$,按下式确定机组组合调整措施:

$$u_{i,t} = \begin{cases} 0 \rightarrow 1 & p^+(i, t) > 0 \\ 1 \rightarrow 0 & p^-(i, t) > 0 \end{cases} \quad (16)$$

对于需要停机的机组,程序改变其组合状态,并将其期望计划出力置为0;对于需要开机的机组,程序改变其组合状态,并修改其期望计划,若松弛变量 $p^+(i, t)$ 大于其出力下限,则将其期望计划出力置为松弛变量值,否则置为出力下限。

求解中会出现如下问题:多台机组出力对某一断面的灵敏度相同,为消除同一断面潮流越限,出现了几台机组松弛约束但松弛量很小的情况。这是由于优化模型以最小代价来消除潮流越限,能够保证相同灵敏度机组的松弛变量总和最小,但松弛量在机组间的分配具有随机性。同时调整这几台机组的组合状态,又不太合理。为此,本文选取松弛变量值最大的机组,改变其组合状态和出力,再与优化迭代运行,通过逐步调整机组的组合状态,获得满足约束的发电计划。

在调整机组开停时,本文没有考虑机组的最小开停机时间约束,但从国内以火电机组为主的运行实际出发,机组开停费用高昂,一天之内不会多次开停,因此,若有时段需要改变机组的开停状态,就将当天余下所有时段置为相同的组合状态。

4 安全校正流程

利用上述策略,可以实现发电计划的安全校正,其主要功能是:如果系统可以通过优化机组出力来保证发电计划可行,则仅进行出力调整;如果必须对机组开停进行修正,则进一步给出机组组合状态的调整措施。流程图如图2所示。

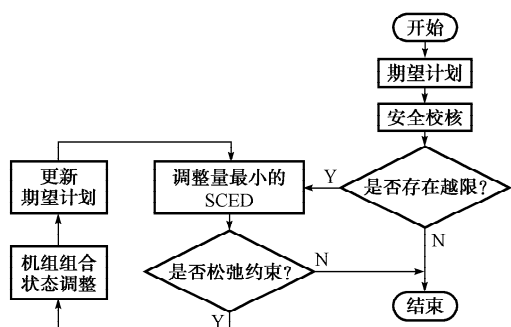


图2 安全校正流程

Fig. 2 Flow chart of security correction

通过松弛机组出力限值约束,可以根据优化后的松弛情况,在安全校正内实现机组组合状态的自动调整,从而获得更可靠的发电计划,提升发电计划

安全校正算法的鲁棒性。

但在有些情况下,即使调整了机组组合状态和出力,仍可能无法消除潮流越限,造成优化模型无解。为此,在模型中同时增加了对电网安全约束的松弛,来提高算法的鲁棒性。这样,模型中就有了机组出力限值和网络安全这2类约束的松弛,可以通过松弛约束优先级控制,优先松弛机组出力限值约束,而不希望网络安全约束被突破。松弛约束优先级控制方法参见文献[12],本文不再赘述。

5 实例分析

以某省级电力系统为例进行分析。系统包括144台发电机组,总装机容量为52 172 MW,共109个安全约束断面。在获得日前96点期望计划后,对其进行安全校正。

5.1 断面越限,无需调整机组组合状态

在该省级电网中,一个220 kV分区电网通过2台变压器组成的输电断面接入500 kV环网受电,如图3所示。输电断面的稳定限额为1 250 MW,220 kV分区电网中有4台300 MW的发电机组,分区高峰负荷为2 000 MW。

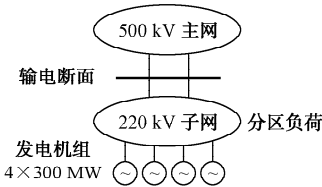


图3 算例电网结构示意图
Fig.3 Illustration structure of the example grid

期望计划中,分区内4号机组停机。由于期望计划没有考虑安全约束,造成断面在多个时段越限。优化后,松弛变量 $p^+(i,t)$ 和 $p^-(i,t)$ 均为0,即无需改变机组组合状态,通过调整机组出力就可消除潮流越限。安全校正前后的断面潮流变化如图4所示,1号机组出力计划如图5所示。

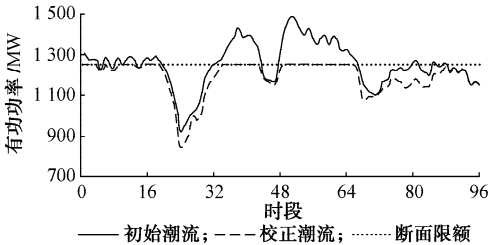


图4 安全校正前后的断面潮流变化
Fig.4 Power flow before and after security correction

由图4和图5可以看出,安全校正后,分区内机组出力增加,但并未达到最大出力300 MW。此时,

输电断面的潮流越限被消除,高峰时段输电断面处于限值运行,潮流达到1 250 MW。

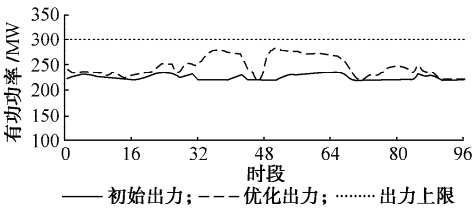


图5 安全校正前后的机组出力变化
Fig.5 Unit output before and after security correction

在负荷最高的第51时段,部分机组出力调整量(绝对量)如表1所示,其中前3台机组为分区内的开机机组。

表1 单时段机组出力调整量
Tab.1 Power adjustment of units in single period

机组	出力调整/MW	机组	出力调整/MW
1	52	7	3
2	53	8	4
3	52	9	4
4	3	10	3
5	3	11	3
6	3	12	4

由表1可以看出,受安全约束影响,分区内的3台开机机组出力调整量较大,但机组间相对均衡;区外机组主要用于负荷平衡,出力调整量较小且相对一致。通过在优化目标中引入出力调整量的递增成本,可使各机组出力尽可能地贴近其期望计划出力,避免了出力调整的随机性。

5.2 断面越限,需要调整机组组合状态

仍以上述分区模型为例,将输电断面的限额由1 250 MW降至1 000 MW。由于断面限额降低,期望计划在大多数调度时段内越限。此时,仅依靠调整分区内3台开机机组出力将无法消除输电断面潮流越限。

优化后,在负荷高峰时段,分区内3台开机机组出力达到上限,同时,4号机组的松弛变量 $p^+(i,t) > 0$,如图6所示。这意味着需要将其状态由停机修正为开机,才能消除潮流越限。

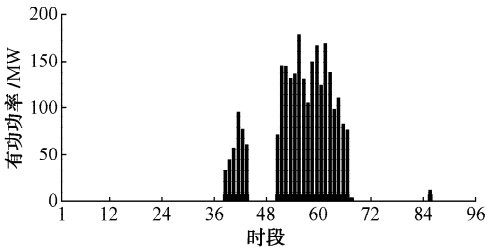


图6 4号机组松弛变量的96时段优化结果
Fig.6 Relax variable result of unit 4 during 96 periods

根据松弛变量优化结果,调整4号机组为开机,并修改其出力计划,将此改变更新到期望计划中。在优化过程中,调整系统机组的出力,来保证负荷平衡。

执行优化程序后,输电断面潮流越限得以消除,且松弛变量全部为0,安全校正结束。

参考文献

- [1] 姚建国,严胜,杨胜春,等. 中国特色智能调度的实践和展望[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 16-20.
YAO Jianguo, YAN Sheng, YANG Shengchun, et al. Practice and prospects of intelligent dispatch with Chinese characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 16-20.
- [2] 葛朝强,汪德星,葛敏辉,等. 华东网调日计划安全校核系统及其扩展[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 45-48.
GE Zhaoqiang, WANG Dexing, GE Minhui, et al. Security checking system for daily generation scheduling of East China power grid and its expansion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 45-48.
- [3] 喻洁,宋燕敏,胡俊,等. 发电市场技术支持系统中的有功安全校正策略[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 7-10.
YU Jie, SONG Yanmin, HU Jun, et al. Strategy of active power security correction in power market operator system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 7-10.
- [4] 郑延海,张小白,钱玉妹,等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 49-52.
ZHENG Yanhai, ZHANG Xiaobai, QIAN Yumei, et al. Hybrid algorithm for real-time security constrained dispatch of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 49-52.
- [5] JABR R A, COONICK A H, CORY B J. A homogeneous linear programming algorithm for the security constrained economic dispatch problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 930-936.
- [6] RUIZ P A, PHILBRICK C R, ZAK E, et al. New real time market applications at the California independent system operator [C]// Proceedings of IEEE/PES Power Systems

- Conference and Exposition, October 10-13, 2004, New York, NY, USA: 1228-1233.
- [7] MA X W, SONG H L, HONG M G, et al. The security constrained commitment and dispatch for midwest ISO day-head co-optimized energy and ancillary service market[C]// Proceedings of IEEE/PES 2009 General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada: 1-8.
 - [8] 陈之栩,谢开,张晶,等. 电网安全节能发电日前调度优化模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 10-13.
CHEN Zhixu, XIE Kai, ZHANG Jing, et al. Optimal model and algorithm for day ahead generation scheduling of transmission grid security constrained convention dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 10-13.
 - [9] CHANG G W, AGANAGIC M, WRIGHT J G, et al. Experiences with mixed-integer programming based approaches on short-term hydro scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 743-749.
 - [10] STREIFFERT D, PHILBRICK R, OTT A. A mixed integer programming solution for market clearing and reliability analysis[C]// Proceeding of IEEE/PES 2005 General Meeting, June 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA: 2724-2731.
 - [11] CARRION M, ARROYO J M. A computationally efficient mixed integer linear formulation for the thermal unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
 - [12] 杨争林,唐国庆,李利利,等. 松弛约束发电计划优化模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 53-57.
YANG Zhenglin, TANG Guoqing, LI Lili, et al. Application of relaxed constraints model on generation schedule optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 53-57.

李利利(1987—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行优化。E-mail: lilili8710@163.com

姚建国(1963—),男,研究员级高级工程师,硕士生导师,主要研究方向:EMS和电力系统智能调度。

杨争林(1974—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统运行优化和电力市场。

Generation Schedule Security Correction Strategy of Considering Unit Commitment Adjustment

LI Lili¹, YAO Jianguo², YANG Zhenglin¹, GENG Jian¹

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Generation schedule security correction is an important part of power system operations planning and system operations. A new strategy for security correction of generation schedules is proposed. The minimum bias based security constrained economic dispatch (SCED) model is used in this strategy. Furthermore, by relaxing unit power generation limit constraints, if the system security cannot be achieved by merely adjusting generation outputs, then the overload of flow gate can be alleviated by adjusting the unit commitment states. Consequently, the robustness of security correction can be increased. Analysis of actual system examples shows the effectiveness of the proposed algorithm. On this basis, linear programming-based scheduling system has been developed and applied to a provincial power grid successfully.

This work is supported by National Key Technology Research and Development Program of China (No. 2008BAA13B06) and State Grid Corporation of China (No. SG0835).

Key words: generation scheduling; security correction; SCED; relaxed constraints; unit commitment adjustment; linear programming